Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 3, Jul.-Agu. 2024, p. 411-427

Investigating the Spatial Distribution and Trend of Dust Mass Density in West Asia and Its Relationship with Climate Variables

Sh. Katorani[1], M. Ahmadi [2]*, A. Dadashi-Roudbari[3]
1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, respectively.
(*- Correspounding Author Email: Ma_ahmadi@sbu.ac.ir)
3- Postdoctoral Research Associate of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 08-01-2024 Revised: 24-05-2024 Accepted: 28-05-2024 Available Online: 28-05-2024	**How to cite this article:** Katorani, Sh., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Investigating the spatial distribution and trend of dust mass density in West Asia and its relationship with climate variables. *Journal of Water and Soil, 38*(3), 411-427. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86233.1367

Introduction

Dust emission is considered as one of the environmental hazards in arid and semi-arid regions. Understanding the effective variables in increasing dust mass density is very important for early warning and reducing its imposing damages. One of the main and effective variables in the occurrence of dust is the geographical and climate characteristics of the origin areas and areas affected by this phenomenon. Feeding the great rivers of Mesopotamia, it has reduced soil moisture. Also, the wind component is one of the reasons for the increase in dust in these areas. This study examines the relative importance of climatic variables to investigate seasonal and monthly changes in dust emission in West Asia and parts of South and Central Asia.

Materials and Methods

This study has examined West Asian dust from three perspectives spatial distribution, trends, and their relationship with climate variables. For this purpose, the Dust Column Mass Density (DUCMASS) variable output of the MERRA-2 dataset was used to investigate the spatial distribution of the dust mass density trend, and the AgERA5 dataset was used to investigate the seasonal and monthly changes of precipitation, wind speed, and temperature variables from 1981 to 2020. In this study, the modified Mann-Kendall (MMK) trend test method was used to investigate the trend of dust occurrence in the study area, and the Sen's slope estimator (SSE) test was used to investigate the slope of the trend and to better display the changes in dust mass density in the western region. the results of the SSE test have been examined on a decade scale.

Results and Discussion

Investigating the possible climate drivers in the changes of dust mass density for different regions by calculating the correlation between the time series of dust mass density and the variables of temperature, precipitation, and wind speed has been investigated. The results showed that there is an inverse correlation between dust mass density and precipitation and a direct relationship between dust mass density and temperature and wind speed. The highest correlations between dust mass density and temperature have been calculated, and this value has reached 0.9 in the warm months of the year. On the other hand, the highest negative correlations have been calculated in the cold period of the year (winter and autumn seasons) between dust concentration and precipitation with a value of -0.7. The correlation coefficient between dust mass density and wind speed in the months of January to May and November to December was mostly above 0.6. This value shows a lower correlation in the summer season.

In most months of the year, dust mass density shows an increasing trend in most regions, from March to July, an

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86233.1367

increasing trend in active dust springs in Mesopotamia, the deserts of Iraq and Syria, the desert of Rub' Al Khali, Ad-Dahna and Al Nufud Al Kabir were observed in Arabia and Thar desert in Pakistan. This increasing trend started cyclically from the beginning of spring and reaches its peak in June and July, and the intensity of the trend decreases from September and reaches its minimum value in December. The important point is that the cycle of changes in the monthly trend of dust mass density coincides with the cycle of changes in dust mass density. The northern parts of Iran and Turkey have the highest frequency among different months of the year with a decreasing trend of dust mass density. The increasing trend of dust mass density in the spring and summer seasons in Mesopotamia, the deserts of Iraq, Syria, and Yemen, the Sistan Plain, and the Thar desert in Pakistan and the southeast of Iran was significant at the level of 0.05.

Conclusion

The results revealed that the seasonal changes in dust mass density show well the active sources of dust in the studied area. In the spring and summer seasons, the activity of the dust centers located in the west of the study area, including the Rub' al Khali, Ad-Dahna and Al Nufud Al Kabir deserts, Mesopotamia, the deserts of Iraq and Syria, increases and on the arrival of dust to the west and southwest Iran affects. The investigation showed that climate variables play a key role in the variability of dust mass density in the study area so the areas corresponding to the summer north wind and the 120-day wind of Sistan have shown the highest dust mass density in annual variability. The correlation coefficient between dust mass density with temperature and direct wind speed and its correlation with negative precipitation have been obtained. The results showed that dust mass density has an increasing trend in most of the regions, so from March to August (spring and summer), the increasing trend of dust mass density is significant at the level of 0.05. The highest intensity of the increasing trend was observed in the spring and summer seasons in Mesopotamia, the deserts of Iraq, Syria, and Yemen, the Sistan Plain, and the Thar desert in Pakistan and southeast Iran.

Keywords: Dust mass density, Dust trend, MERRA-2 dataset, West Asia

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۸، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۳، ص. ۴۲۷-۴۱۱

بررسی پراکنش فضایی و روند غلظت گرد و خاک در غرب آسیا و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی

شلیر کاتورانی[۱]- محمود احمدی[۲]*- عباسعلی داداشی رودباری[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸

چکیده

گردوخاک یکی از شاخص‌های مهم تغییر اقلیم است. با این حال، پیوند بین گرد و خاک و اقلیم به‌دلیل بازخوردهای مستقیم و غیرمستقیم در سامانه زمین بسیار پیچیده است. این مطالعه پراکنش فضایی و روند گردوخاک‌های غرب آسیا و ارتباط آن‌ها را با متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد مورد بررسی قرار داده است. بدین‌منظور برای بررسی پراکنش فضایی روند غلظت گردوخاک از برونداد متغیر غلظت گردوخاک مجموعه داده MERRA-2 و برای بررسی متغیرهای اقلیمی، مجموعه داده AgERA5 استفاده شد. تغییرات فصلی غلظت گرد و خاک به خوبی چشمه‌های فعال گرد و خاک در منطقه مورد مطالعه را مشخص کرد. بررسی کارایی متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد نشان داده است مجموعه داده AgERA5 دما را با کارایی بالاتری نسبت به بارش و تندی باد در ایستگاه‌های نماینده پهنه‌های اقلیمی در غرب آسیا برآورد می‌کند. از بین سه متغیر مورد بررسی، تندی باد کارایی به نسبت کمتری را نسبت به دما و بارش نشان داده است. به‌طور کلی مجموعه داده AgERA5 دارای کارای قابل قبولی در برآورد متغیرهای اقلیمی است و در مناطق فاقد داده از این مجموعه داده می‌توان به‌عنوان یک داده جایگزین استفاده کرد. نتایج نشان داد که متغیرهای اقلیمی نقش کلیدی را در تغییرپذیری غلظت گردوخاک در منطقه مورد مطالعه دارند، بطوریکه مناطق منطبق بر باد شمال تابستانه و باد ۱۲۰ روزه سیستان بالاترین غلظت گردوخاک سالانه را دارند. بالاترین ضریب همبستگی بین غلظت گردوخاک با دما در ماه‌های گرم سال به بیش از ۰/۸ و با تندی باد در ماه‌های ژانویه تا می و نوامبر تا دسامبر بیشتر از ۰/۶ و همبستگی آن با بارش در ماه‌های سرد سال ۰/۷- محاسبه شده است. غلظت گردوخاک روند افزایشی را در مناطق بیابانی ربع‌الخالی، النفود، الدهنا، بین‌النهرین، بیابان‌های عراق و سوریه داشته به‌طوری‌که از ماه‌های مارس تا اوت (بهار و تابستان) روند افزایشی غلظت گردوخاک در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. بالاترین شدت روند افزایشی در فصول بهار و تابستان در مناطق بین‌النهرین، بیابان‌های عراق، سوریه و یمن، دشت سیستان و بیابان تار در پاکستان و جنوب شرق ایران مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: روند گردوخاک، غلظت گردوخاک، غرب آسیا، مجموعه داده MERRA-2

مقدمه

یکی از مخاطرات طبیعی و رایج در سال‌های اخیر که به‌طور ویژه محیط‌های شهری و انسانی را آسیب‌پذیر کرده است، پدیده گردوخاک می‌باشد که کنترل و مدیریت آن بسیار دشوار و هزینه‌بردار خواهد بود. یکی از عوامل اصلی و مؤثر در رخداد این پدیده، موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی مناطق مبدأ و مناطق متأثر از این پدیده است (Soltani *et al*., 2021). هر سال حدود ۲۰۰۰ تن گردوخاک وارد جو می‌شود که ۷۵ درصد آن در خشکی و ۲۵ درصد آن در اقیانوس‌ها نهشت می‌کند (Shao *et al*., 2011). اگر چه گرد و خاک پدیده اقلیمی رایج در مناطق خشک و بیابانی است اما شواهد نشان می‌دهد که این پدیده در تمامی مناطق اقلیمی اتفاق می‌افتد (Fallah Zazuli *et al*., 2014). این پدیده به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی در سال

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Ma_ahmadi@sbu.ac.ir)
۳- پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86233.1367

های اخیر در منطقه خاورمیانه و به‌ویژه ایران تبدیل شده است (Jafari *et al*., 2021).

گردوخاک موجود در جو، می‌تواند دی‌اکسید کربن جوی (Rushingabigwi *et al*., 2020)، ازن جوی (Mukherjee *et al*., 2020)، بودجه تابشی جو (Alam *et al*., 2010)، بهداشت و سلامت (Goudie & Middleton,2006) و اقتصاد منطقه (Alonso *et al*., 2020) را تحت تاثیر قرار دهد و با تغییر مشخصات خرد فیزیک ابرها بر مقدار بارش اثرگذار باشد (Li *et al*., 2016).

متغیرهای اقلیمی نقش بسزایی در مطالعات گردوخاک دارند به طوری‌که کاهش بارش در دهه‌های گذشته به‌ویژه در خاورمیانه که منطقه‌ی تغذیه رودهای بزرگ بین‌النهرین می‌باشد، رطوبت خاک را کاهش داده است. همچنین افزایش فراوانی عبور امواج کوتاه و سریع با مؤلفه‌ی باد مداری قوی از دلایل افزایش گردوخاک در این مناطق شده است. پدیده گردوخاک با تندی باد و فرسایش‌پذیری (یعنی شرایط سطح زمین) ارتباط مستقیم دارد (Wu *et al*., 2020). همچنین توپوگرافی متنوع و توزیع دما و بارش به شکل‌گیری شرایط برای ایجاد گرد و خاک کمک می‌کند (Dar *et al*., 2022). لذا بررسی توامان رخداد گردوخاک با متغیرهای اقلیمی می‌تواند نقش مهمی را در شناسایی این پدیده بخصوص در مناطق مستعد رخداد گردوخاک داشته باشد. مسئله اصلی این تحقیق بررسی غلظت گردوخاک و روند تغییرات آن طی چهار دهه گذشته است. همچنین نقش متغیرهای اقلیمی به‌عنوان یکی از محرک‌های کلیدی گردوخاک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

تحقیقات زیادی به بررسی نقش متغیرهای اقلیمی در رخداد گردوخاک پرداخته‌اند که این مطالعات در سطح جهانی بر اساس منطقه مورد مطالعه و نوع داده‌های مورد استفاده بسیار متنوع می‌باشند. در یک طبقه‌بندی اولیه مطالعات انجام شده را می‌توان به مطالعاتی که به بررسی ارتباط متغیرهای اقلیمی شامل بارش، دما و تندی باد در ایجاد و نقش آن‌ها در افزایش گردوخاک پرداخته‌اند تقسیم کردند. از این دست مطالعات می‌توان به پژوهش‌های انجام شده در چین (Chen *et al*., 2021; Wu *et al*., 2020; Middleton, 2019)، ایران (Dadashi-Roudbari & Ahmadi 2021; Boroghani *et al*., 2019)، هند (Jin *et al*., 2021; Shi *et al*., 2021) و پاکستان (Dar, 2022; Tariq *et al*., 2021) اشاره کرد. بیشتر این مطالعات روند افزایشی را برای گردوخاک گزارش کرده‌اند، همچنین نتایج این مطالعات نشان داده است که کاهش بارش، افزایش تندی باد، افزایش دما، افزایش تبخیر-تعرق با افزایش گردوخاک رابطه معنی‌داری داشته است.

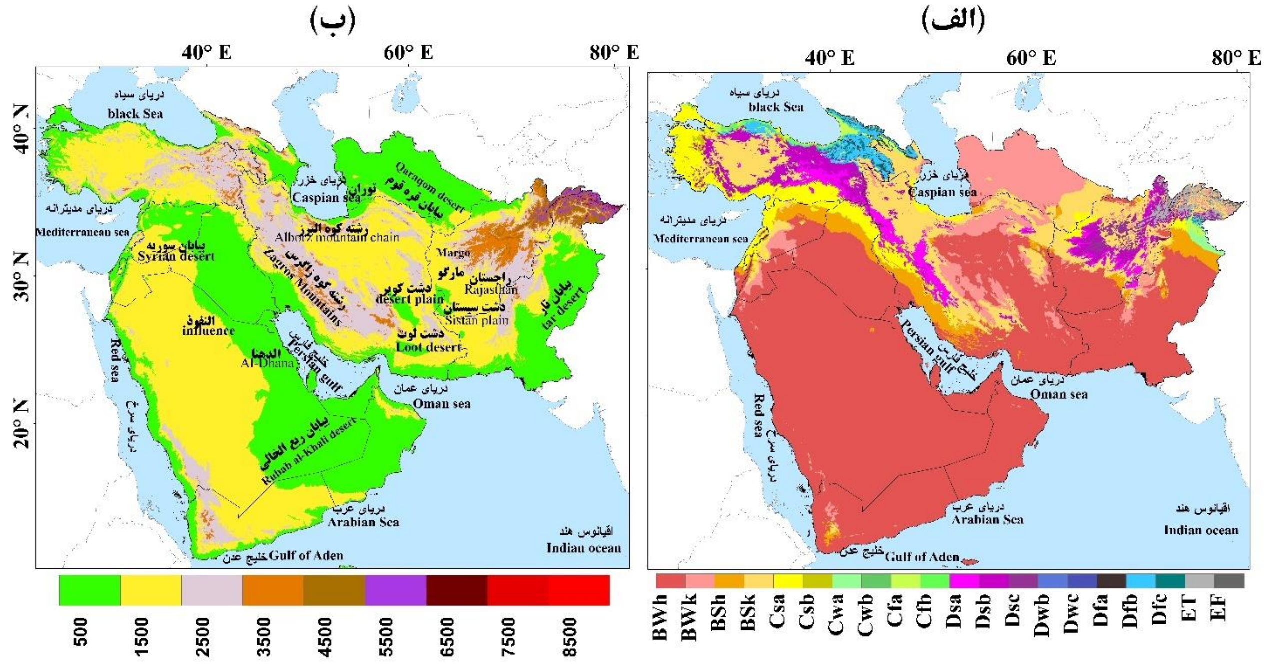
در گروه دیگر از مطالعات انجام شده که بر مبنای داده می‌توان آن‌ها را تقسیم بندی کرد می‌توان به پژوهش‌های انجام شده با استفاده از از داده‌های بازتحلیل (Middleton *et al*., 2021; Hersbach *et al*., 2020)، محصولات سنجش از دور (Sun; Sujitha *et al*., 2022; Caido *et al*., 2022) و داده‌های ایستگاهی (Middleton *et al*., 2021; Sarkar *et al*., 2019) اشاره کرد. این مطالعات کارایی محصولات سنجش از دور و بازتحلیل را در برابر داده-های مشاهداتی برای مطالعه گردوخاک مورد تأیید قرار داد و نشان دادند که کاربست داده‌های نام‌برده می‌تواند در شناخت بهتر این پدیده در سطح جهانی کمک کند.

آسیا و بخصوص غرب آسیا به‌دلیل وجود بیابان‌های بزرگ، پس از آفریقا دومین منبع بزرگ گردوخاک در جهان است (Jin *et al*., 2021) با توجه به اینکه عوامل زیادی بر الگوهای زمانی-مکانی گرد و خاک تأثیر می‌گذارند، اهمیت نسبی این عوامل برای انتشار گردوخاک در سراسر خاورمیانه تا آسیای جنوبی به خوبی مستند نشده است. لذا این مطالعه اهمیت نسبی این عوامل را برای بررسی تغییرات فصلی و ماهانه انتشار گردوخاک در غرب آسیا و بخش‌هایی از آسیای جنوبی و مرکزی مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این تحقیق دستاوردهای زیادی را در زمینه مطالعات گردوخاک در غرب آسیا خواهد داشت. همچنین این مطالعه با بررسی متغیرهای اقلیمی و ارتباط آن با غلظت گردوخاک می‌تواند سهم نسبی متغیرهای اقلیمی را در رخداد و انتشار این پدیده نشان دهد.

داده‌ها و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کشورهای واقع در غرب آسیا و همچنین پاکستان و افغانستان از آسیای جنوبی و ترکمنستان از آسیای مرکزی است (شکل ۱). با انتخاب این مناطق بهتر می‌توان به بررسی چشمه‌های گردوخاک مؤثر بر ایران بحث کرد. این منطقه دارای بیابان-های وسیعی شامل بیابان تار، دشت مارگو، دشت لوت، دشت کویر، بیابان قره قوم، دشت سیستان، بیابان قزل قوم، ربع‌الخالی، بیابان سوریه و النفوذ است. منطقه مورد مطالعه از نظر توپوگرافی بسیار پیچیده است این امر باعث شده تا از نظر پهنه‌های اقلیمی نیز غرب آسیا دارای تنوع زیادی باشد. با این حال در بخش‌های وسیعی از غرب آسیا اقلیم بیابانی گرم (Bwh) حکم فرماست (شرح کامل هر یک از پهنه‌های اقلیمی در جدول ۱ ارائه شده است). افزایش چشمگیر رخداد گردوخاک در سال‌های اخیر در این منطقه به‌دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک، وجود بیابان‌های وسیع، سدسازی‌های گسترده در بالادست و خشک شدن مسیر رودها در پایین دست و تغییرات گسترده کاربری اراضی است.



(B) (A)

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ الف) پهنه‌های اقلیمی کوپن-گایگر و ب) مدل رقومی ارتفاعی (DEM)

Figure 1- Location of the study; A) Köppen-Geiger climate classification and B) digital elevation model (DEM)

داده‌های مورد استفاده

منطقه غرب آسیا دارای بیابان‌های وسیع و همچنین رشته‌کوه‌های بزرگ و پیچیده‌ای است این دو مشخصه جغرافیایی به همراه سال‌ها جنگ در کشورهای همانند عراق، سوریه و یمن باعث شده است تا این منطقه از جهان داده مشاهداتی مناسبی در اختیار نداشته باشد. وجود داده‌های اقلیمی بلند مدت و عدم قطعیت پایین نقش کلیدی را در پژوهش‌های علوم جوی دارد. در این تحقیق از دو گروه داده‌های MERRA-2 و AgERA5 برای بررسی غلظت گردوخاک و همچنین بررسی نقش متغیرهای اقلیمی بر رخداد گردوخاک استفاده شده است.

داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی ایران)

داده‌های مشاهداتی کنترل کیفی شده در پژوهش‌های مرتبط با علوم جوی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در این تحقیق به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های ایستگاهی کشورهای مورد بررسی در غرب آسیا برای درستی سنجی متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد از هفت ایستگاه هواشناسی همدیدی ایران (یزد، مشهد، شیراز، تبریز، بابلسر، رشت و شهرکرد) به‌ترتیب عنوان نماینده اقلیمی پهنه‌های BWh، BWk، BSh، BSk، Csa، Cfa و Dsa استفاده شده است. از داده‌های این هفت ایستگاه در مقیاس سالانه برای سه متغیر دما، بارش و تندی باد طی دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است.

مجموعه داده بازتحلیل AgERA5

مجموعه داده‌های بازتحلیل ECMWF یکی از مهمترین داده‌های در دسترس در سطح جهانی می‌باشد که مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد. مطابق تحقیقات انجام شده، مقدار خطای این مجموعه داده در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در بسیاری از نقاط جهان بسیار پایین است (Bell *et al.*, 2021). کارایی این مجموعه داده برای متغیرهای مختلف اقلیمی همانند بارش (Asadi Rahim-Begi *et al.*, 2022) و دما (Heydari *et al.*, 2023) در ایران نیز مورد تأیید قرار گرفته است. نتایج تحقیقات پیشین نشان داده است که از این داده می‌توان به‌عنوان جایگزین در مناطق فاقد داده به‌عنوان داده مشاهداتی استفاده کرد. مجموعه داده ERA5 پنجمین محصول بازتحلیل جوی جهانی مرکز ECMWFاست که به‌دنبال نسخه‌های قبلی شامل ERA۱۵، ERA۴۰ و ERA-Interim ارائه شده است (Hersbach *et al.*, 2020). این مجموعه داده برآوردهای ساعتی متغیرهای جوی را با تفکیک افقی ۳۱ کیلومتر ارائه می‌دهد. سامانه داده‌گواری ERA5 بر اساس داده‌های مختلف ماهواره‌ای، ایستگاهی، برونداد مدل، داده‌های جو بالا و بویه‌هایی دریای است ترکیب این داده‌ها به‌همراه مدل‌سازی های پیشرفته باعث شده است تا عدم قطعیت این مجموعه داده بسیار پایین باشد (Jiao *et al.*, 2021).

جدول ۱- طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر برای منطقه مورد مطالعه

Table 1- Köppen-Geiger climate classification for the study area

طبقه‌بندی کوپن گایگر Köppen-Geiger classes	توضیحات طبقه‌بندی کوپن گایر Köppen-Geiger classes Description
BWh	اقلیم بیابانی گرم Arid, desert, hot
BSk	اقلیم استپ یا نیمه‌خشک با بیابان‌های سرد Arid, steppe, cold
BWk	اقلیم بیابانی سرد Arid, desert, cold
Csa	اقلیم گرم معتدل با تابستان خشک و بسیار گرم Temperate, dry summer, cold summer
BSh	اقلیم استپ یا نیمه‌خشک با بیابان‌های گرم Arid, steppe, hot
Dsb	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم Cold, dry summer, warm summer
Dsa	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم Cold, dry summer, hot summer
Dfb	اقلیم برفی بسیار مرطوب با تابستان گرم Cold, no dry season, warm summer
Dsc	اقلیم برفی با تابستان‌های تابستان‌های خشک و خنک و زمستان سرد Cold, dry summer, cold summer
ET	اقلیم تندرا Polar, tundra
Cfa	اقلیم گرم معتدل بسیار مرطوب با تابستان بسیارگرم Cold, no dry season, hot summer
Dfc	اقلیم برفی بسیار مرطوب با تابستان خنک و زمستان سرد Cold, no dry season, cold summer
Csb	اقلیم گرم معتدل با تابستان خشک و گرم Temperate, dry summer, warm summer
Cfb	اقلیم گرم معتدل بسیار مرطوب با تابستان گرم Temperate, no dry season, warm summer
Cwa	اقلیم گرم معتدل با زمستان خشک و تابستان بسیار گرم Temperate, dry winter, hot summer
Dfa	اقلیم برفی بسیار مرطوب با تابستان بسیار گرم Cold, no dry season, hot summer
EF	اقلیم یخبندان Polar, frost
Dwb	اقلیم برفی با زمستان‌های خشک و تابستان گرم Cold, dry winter, warm summer
Dwc	اقلیم برفی با زمستان‌های خشک و سرد و تابستان خنک Cold, dry winter, cold summer
Cwb	اقلیم گرم معتدل با زمستان خشک و تابستان گرم Cold, dry winter, warm summer

در این مطالعه از مجموعه داده AgERA5 برای بررسی تغییرات فصلی و ماهانه متغیرهای بارش، تندی باد و دما از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. مزیت به کارگیری مجموعه داده‌های AgERA5 نسبت به داده‌های ERA5-LAND و نسخه معمولی ERA5 در این است که مجموعه داده‌های AgERA5 نسبت به داده‌های اولیه ERA5 تفکیک افقی بالاتری (حدوداً ۱۰ کیلومتر) برخوردار است (Yu *et al.*, 2021). در این مجموعه داده تصحیحات مختلفی از جمله برهمکنش دریا-خشکی، تصحیحات توپوگرافی و کاربری اراضی انجام شده است

در نتیجه عدم قطعیت به‌دلیل تصحیحات انجام شده در فیزیک مدل و تفکیک افقی تا حد زیادی کاهش یافته است (Brown *et al.*, 2023).

مجموعه داده MERRA-2

در این پژوهش جهت بررسی تغییرات غلظت گردوخاک و همچنین آشکارسازی چشمه‌های فعال گردوخاک در منطقه مورد مطالعه از محصول (DUCMASS)[1] در مقیاس ماهانه استفاده شد. این محصول یکی از محصولات مجموعه داده بازتحلیل MERRA-2 با تفکیک افقی ۰/۵×۰/۶۲۵ درجه قوسی است. مجموعه داده MERRA-2 یک داده باز تحلیل بلندمدت جوی است که از سال ۱۹۸۰ ناسا با ترکیب نسخه ۵ مدل (GEOS) برای ایجاد مجموعه داده‌های جوی در مقیاس بزرگ تولید نموده است (Liu *et al.*, 2022). این مجموعه داده اوّلین بانک داده بازتحلیل جهانی بلندمدت مبتنی بر مشاهدات ماهواره و برونداد مدل است. مجموعه داده فعلی دومین بازنگری ناسا از MERRA است که بر اساس داده‌های ماهواره‌ای (MISR، MODIS و AVHHR) و AERONET تولید شده است (Koster *et al.*, 2016). همانطور که گفته شد در این تحقیق از متغیر غلظت گردوخاک استفاده شده است. از آنجایی‌که متغیر اندازه‌گیری شده ایی در کشور برای این غلظت گردوخاک وجود ندارد، لذا امکان درستی‌سنجی محصول DUCMASS وجود ندارد. با این حال، از آنجایی‌که این محصول از داده‌های ماهواره‌های MISR، MODIS و AVHHR و داده‌های اندازه‌گیری شده AERONET در ایستگاه‌های زمینی استفاده می‌کند، دارای عدم قطعیت پایینی خواهد بود. از طرف دیگر درستی سنجی متغیر PM2.5 از مجموعه داده MERRA-2 در ایران نشان داده است که این مجموعه داده در برآورد ذرات معلق دارای کارایی قابل قبولی است (Dadashi-Roudbari *et al.*, 2020).

بررسی روند رخداد گردوخاک با استفاده از روش من کندال تصحیح شده

در پژوهش حاضر برای بررسی روند رخداد گردوخاک در منطقه مورد مطالعه از روش من کندال تصحیح شده (MMK) و جهت بررسی شیب روند از آزمون سنس (SSE) استفاده شده است. آزمون من کندال (MK) یک آزمون ناپارامتریک جهت بررسی روند است. آزمون من–کندال تصحیح شده برای جلوگیری از تأثیر خودهمبستگی سری زمانی داده‌ها یک ضریب تصحیح بر اساس اندازه نمونه مؤثر (ESS) به محاسبات واریانس اضافه می‌کند (Hamed *et al.*, 1998). برای محاسبه روند داده‌های اقلیمی آزمون من کندال تصحیح شده نسبت به آزمون من کندال کلاسیک قابل اعتمادتر است (Daufresne *et al.*, 2009). روش ناپارامتریک سنس جهت برآورد نمودن شیب واقعی یک روند در یک سری زمانی است که بزرگی روند را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای نمایش بهتر تغییرات غلظت گردوخاک در منطقه غرب آسیا نتایج آزمون سنس در مقیاس دهه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در (شکل ۴) به همراه سطح معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ ارائه شده است.

درستی‌سنجی متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های نماینده پهنه‌های اقلیمی

درستی‌سنجی متغیرهای اقلیمی برای درک وضعیت اقلیم گذشته و همچنین آینده بسیار مهم است. در این تحقیق برای بررسی نقش متغیرهای اقلیمی در رخداد گردوخاک در منطقه غرب آسیا از سه متغیر دما، تندی باد و بارش استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد از نظر جغرافیایی یک منطقه وسیع است و داده‌های مشاهداتی برای سایر کشورها به‌دلایل بسیاری زیادی همانند فقدان داده اندازه‌گیری، طول دوره آماری ناکافی و در نهایت مسائل سیاسی و ... در دسترس نمی‌باشد. برای این منظور، جهت درستی‌سنجی سه متغیر نامبرده از مجموعه داده AgERA5 هفت پهنه اقلیمی غالب در منطقه غرب آسیا شناسایی و سپس از هر پهنه اقلیمی یک ایستگاه به‌عنوان نماینده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی ایران انتخاب و درستی‌سنجی با استفاده از سه سنجه کارایی کلینگ–گوپتا (KGE)، ضریب توافق (d) و ضریب همبستگی (r) انجام شد. روابط آماری این سه سنجه در جدول ۲ ارائه شده است. همبستگی، مقدار ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند. این روش یک مقدار واحد بین ۱- و ۱ ارائه می‌دهد، که در آن ۱- نشان‌دهنده همبستگی منفی کامل، ۱+ نشان‌دهنده همبستگی مثبت کامل و ۰ بیانگر نبود ارتباط خطی است. در ارزیابی کارایی مدل یا مجموعه داده‌های بازتحلیل و یا حتی داده‌های ماهواره‌ای برای متغیرهای اقلیمی، شاخص توافق ویلموت (d) ابزاری ارزشمند ارائه می‌کند. این سنجه مقدار توافق بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی را ارزیابی می‌کند و دامنه آن از ۰ (عدم توافق) تا ۱ (تطابق کامل) است. شاخص d هم تفاوت در میانگین و هم تغییرات را در نظر می‌گیرد و در مقایسه با روش‌هایی که فقط بر همبستگی تمرکز می‌کنند، ارزیابی جامع‌تری ارائه می‌دهد (Willmott, 1984). سنجه کارایی کلینگ–گوپتا (KGE) با تجزیه کارایی مدل به سه جنبه کلیدی: همبستگی، تغییرات و اریبی، محدودیت‌های سنجه‌های همانند نش–ساتکلیف (NSE) را برطرف می کند. سنجه KGE از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده توافق بهتر بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی است (Knoben *et al.*, 2019).

1- Dust Column Mass Density

جدول ۲- سنجه‌های آماری مورد استفاده شده در پژوهش برای درستی‌سنجی
Table 2- Statistical metrics used in the research for evaluation

سنجه آماری Statistical measure	روش محاسبه Calculation method
کارایی کلینگ-گوپتا Kling-Gupta efficiency	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$,
ضریب‌توافق Coefficient of agreement	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(sim_i - obs_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\lvert sim'_i\rvert + \lvert obs'_i\rvert)^2}\right]$
ضریب همبستگی The correlation coefficient	$r = \frac{(sim_i - \overline{sim})(obs_i - \overline{obs})}{\sqrt{\sum(sim_i - \overline{sim})^2 \sum(obs_i - \overline{obs})^2}}$

در روابط بالا sim_i مقدار برآورد شده، obs_i مقدار مشاهداتی (ایستگاه‌های همدیدی) و n تعدادکل داده‌ها را نشان می‌دهد. sim'_i تفاضل داده برآوردشده و میانگین‌کل داده‌های sim_i در جامعه‌آماری است و obs'_i تفاضل داده مشاهداتی و میانگین کل داده‌های obs_i در جامعه آماری است.

بحث

متغیرهای اقلیمی تغییرپذیری زیادی را در پهنه‌های اقلیمی مختلف دارند. در این تحقیق با توجه به در دسترس بودن داده‌های اقلیمی مشاهداتی ایران یک درستی‌سنجی از برونداد مجموعه داده AgERA5 برای سه متغیر بارش، تندی باد و دما برای هفت پهنه اقلیمی غالب و اصلی در منطقه غرب آسیا انجام شده است. نتایج درستی‌سنجی برای هفت پهنه اقلیمی نماینده در غرب آسیا نشان داده است از بین سه متغیر مورد بررسی مجموعه داده AgERA5 دما را بهتر از بارش و تندی باد برآورد می‌کند. بطوری‌که ضریب همبستگی و ضریب توافق به‌دست آمده برای دما در سطح پهنه‌های اقلیمی نماینده به‌ترتیب بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۷ و ۰/۷۳ تا ۰/۹۳ محاسبه شده است (جدول ۳). مقدار سنجه KGE نیز در ایستگاه‌های مورد بررسی بیش‌تر از ۰/۶۲ بوده است و برای بیشتر ایستگاه‌ها این مقدار بالاتر از ۰/۸ است که نشان دهنده کارایی بالای مجموعه داده AgERA5 در برآورد دما در این پهنه‌های اقلیمی است. متغیر بارش نیز کارایی خوبی را در پهنه‌های اقلیمی نماینده داشته است. بطوری‌که مقدار همبستگی این متغیر بین ۰/۶۸ تا ۰/۹۱ محاسبه شده است. نتیجه ضریب توافق نیز نتایج به‌دست آمده توسط همبستگی را تأیید می‌نماید. از بین سه متغیر مورد بررسی مجموعه داده AgERA5 تندی باد را نسبت به دو متغیر بارش و دمای هوا با دقت کمتری برآورد کرده است. بطوری‌که مقدار ضریب همبستگی بین ۰/۴۸ تا ۰/۷۲ به‌دست آمده است. مقدار سنجه KGE نیز در تمامی ایستگاه‌های نماینده مورد بررسی ۰/۴ محاسبه شده است (جدول ۳). بطور کلی مجموعه داده AgERA5 در برآورد متغیرهای اقلیمی دارای کارایی قابل قبولی است و می‌توان از نتایج آن در مناطق فاقد داده همانند بخش‌های بزرگی از غرب آسیا، آسیای جنوبی و آسیای مرکزی به‌عنوان مکمل یا جایگزین داده‌های مشاهداتی استفاده کرد.

بررسی تغییرات ماهانه غلظت گردوخاک حاصل از برونداد MERRA-2 طی دوره زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ نشان داد که رخداد گردوخاک تابع فصل بوده و مقادیر آن بسته به فصل، طول و عرض جغرافیایی و اقلیم حاکم در منطقه مورد مطالعه تغییرات زیادی را از خود نشان می دهد (شکل ۲). در غرب آسیا هسته‌های بیشینه گردوخاک از ماه مارس پدیدار می‌شوند و در ماه‌های ژوئیه (۱/۱۰ گرم بر متر مربع) و اوت (۱/۲۵ گرم بر متر مربع) با میانگین بلند مدت به بیشینه مقدار خود در طول سال می‌رسند. در ماه‌های گرم سال بیشینه غلظت گردوخاک در منطقه بین‌النهرین و بیابان ربع‌الخالی و الدهنا و النفود در عربستان و مناطق بیابانی سوریه و عمان به‌دلیل کاهش بارش، افزایش دما و تندی باد و فعال شدن چشمه‌های گردوخاک مشاهده می‌شود. این نتیجه در توافق با یافته‌های پیشین (Dadashi-Roudbari, 2020) از اقلیم‌شناسی رخداد گردوخاک در منطقه است. غلظت گردوخاک در منطقه رابطه معکوسی را به عرض جغرافیایی نشان می‌دهد بطوری‌که در بالاتر از مدار ۳۵ درجه شمالی از غلظت گردوخاک به مقدار قابل توجهی کاسته خواهد شد. البته باید توجه داشت که استثناهایی در این زمینه در آسیای مرکزی واقع در بیابان قزل قوم، قره قوم، بستر خشکیده آرال قوم و قره بغاز در ترکمنستان دیده می‌شود. این مقدار از غلظت بالای گردوخاک در حوالی مدار ۴۰ درجه شمالی شاید دور از انتظار باشد اما به‌دلیل دست‌کاری بشر در بستر رودها و تغییر کاربری اراضی این مناطق به چشمه‌های فعال گردوخاک تبدیل شده‌اند و سالانه مقادیر بالایی از گردوخاک را به سمت شمال شرق ایران و کلانشهر مشهد ترابرد می‌کنند (Zarrin *et al.*, 2021).

جدول ۳- درستی‌سنجی مجموعه داده AgERA5 در برآورد متغیرهای اقلیمی بارش، دما و تندی باد در پهنه‌های اقلیمی

Table 3- Evaluation of AgERA5 dataset in estimating climate variables of precipitation, temperature and wind speed in climate zones

بارش
Precipitation

ایستگاه Station	نماینده پهنه اقلیمی Representative of the climatic zone	همبستگی Correlation	ضریب توافق Coefficient of agreement	کارایی کلینگ-گوپتا KGE
Yazd یزد	BWh	0.75	0.78	0.69
Mashhad مشهد	BWk	0.71	0.76	0.68
Shiraz شیراز	BSh	0.91	0.93	0.82
Tabriz تبریز	BSk	0.68	0.54	0.44
Babolsar بابلسر	Csa	0.75	0.77	0.59
Rasht رشت	Cfa	0.75	0.84	0.65
Shahr e Kord شهرکرد	Dsa	0.71	0.64	0.57

دما
Temperature

ایستگاه Station	نماینده پهنه اقلیمی Representative of the climatic zone	همبستگی Correlation	ضریب توافق Coefficient of agreement	کارایی کلینگ-گوپتا KGE
Yazd یزد	BWh	0.97	0.81	0.85
Mashhad مشهد	BWk	0.95	0.93	0.94
Shiraz شیراز	BSh	0.92	0.87	0.81
Tabriz تبریز	BSk	0.93	0.93	0.76
Babolsar بابلسر	Csa	0.92	0.76	0.83
Rasht رشت	Cfa	0.92	0.73	0.62
Shahr e Kord شهرکرد	Dsa	0.87	0.69	0.65

تندی باد
Wind

ایستگاه Station	نماینده پهنه اقلیمی Representative of the climatic zone	همبستگی Correlation	ضریب توافق Coefficient of agreement	کارایی کلینگ-گوپتا KGE
Yazd یزد	BWh	0.48	0.48	0.44
Mashhad مشهد	BWk	0.59	0.43	0.42
Shiraz شیراز	BSh	0.58	0.49	0.48
Tabriz تبریز	BSk	0.72	0.52	0.49
Babolsar بابلسر	Csa	0.52	0.49	0.48
Rasht رشت	Cfa	0.51	0.42	0.43
Shahr e Kord شهرکرد	Dsa	0.62	0.54	0.49

در فصول گرم سال در عرض‌های پایین به‌دلیل وجود مناطق وسیع بیابانی شامل بیابان ربع‌الخالی، النفود و الدهنا در عربستان و بین‌النهرین و مناطق بیابانی عراق و سوریه مقادیر قابل توجهی از گردوخاک را شاهد هستیم که هسته‌های بیشینه آن در بهار در جنوب و غرب منطقه مورد مطالعه شکل گرفته و استان‌های غربی و جنوب غرب ایران شامل ایلام، کردستان و خوزستان را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. وجود رشته کوه‌های زاگرس به‌عنوان سدی مانع از ترابرد گرد و خاک به فلات مرکزی ایران شده است و این مسئله نقش توپوگرافی را در کاهش گردوخاک در منطقه مورد مطالعه به خوبی نشان می‌دهد و در مقابل دست‌کاری بشر در تغییر بستر رودها و خشک شدن دریاچه‌ها و تغییر کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه به‌دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک حاکم بر آن، جریانات غربی و وجود بیابان‌های عظیم از عوامل تشدید گردوخاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

غلظت گردوخاک در راستای طول جغرافیایی نیز تغییرات زیادی را نشان می‌دهد بطوری‌که هرچه از مدار ۲۰ درجه شرقی به مدار ۸۰ درجه شرقی پیش برویم از غلظت گردوخاک کاسته می‌شود اما وجود دو کانون فعال گردوخاک شامل بیابان تار در پاکستان و دشت مارگو در افغانستان این نظم کاهشی را بر هم می‌زند و در این مناطق مقادیر قابل توجهی از گرد و خاک مشاهده می‌شود که استان‌های شرقی و جنوب شرق ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در دوره گرم سال مقادیر قابل توجهی از گردوخاک را به شرق و جنوب شرق ایران ترابرد می‌کنند.

همانطور که در پهنه‌بندی اقلیمی کوپن گایگر نشان داده شد (شکل ۱) غرب و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه و مناطق مرکزی، جنوب و جنوب شرق ایران اقلیم بیابانی گرم (BWh) دارد این مناطق از اوایل بهار با افزایش دما و تندی باد و کاهش بارش مواجه می‌شوند که با کاهش رطوبت خاک از ماه‌های مارس چشمه‌های فعال گردوخاک شروع به فعالیت کرده و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه شدت پیدا می‌کنند و گردوخاک قابل توجهی را به سمت غرب ایران ترابرد می‌کنند و به سمت عرض‌های پایین مناطق شرقی گسترش می‌یابد. در مقابل در دوره سرد سال در ماه‌های دسامبر و ژانویه با کاهش دما و افزایش بارش و رطوبت خاک فعالیت چشمه‌های گردوخاک کاهش می‌یابد (مقادیر همبستگی نزدیک ۰/۷- (شکل ۳)).

بررسی تغییرات ماهانه متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد حاصل از داده‌های AgERA5 در منطقه مورد مطالعه (شکل ۲) نشان می‌دهد که این سه متغیر اقلیمی دارای تغییرپذیری بسیاری زیادی در منطقه مورد مطالعه هستند. در کشورهای عراق، عربستان، سوریه، عمان و یمن و مناطق مرکزی، جنوب و جنوب شرق ایران که دارای اقلیم بیابانی گرم است از اواخر بهار هسته‌های بیشینه در منطقه آشکار شده و دما در ماه‌های ژانویه تا اوت نزدیک به ۴۰ درجه سلسیوس می‌رسد (۳۹/۹۳ درجه سلسیوس). بیشینه مقادیر دما در دوره گرم سال بخصوص در بین‌النهرین، دشت لوت، بیابان ربع‌الخالی، الدهنا، دشت سیستان به‌شکل مناطق قابل توجهی نمایان شده است. در مقابل کمینه دما مناطق کوهستانی و مناطق دارای پوشش گیاهی انبوه همانند شمال ایران و شمال ترکیه به شکل چشم‌گیری کمتر از سایر مناطق است که این امر نقش مهم تأثیر توپوگرافی و پوشش گیاهی را در تعدیل دما به خوبی نشان می‌دهد.

مقایسه هسته‌های بیشینه (شکل ۲-ب) با بیشینه غلظت گردوخاک نشان می‌دهد که مناطقی با دمای هوای بالا مقدار غلظت گردوخاک بالایی نیز دارند. این نتیجه در وهله نخست می‌تواند ناشی از کاهش قابل توجه رطوبت خاک در مناطق نامبرده باشد که جریانات هوا به راحتی باعث جابجایی آن می‌شود. از سوی دیگر افزایش دما در فصول گرم سال، اقلیم بیابانی خشک و نیمه‌خشک در عراق و عربستان، بخش‌هایی از سوریه و اردن و مناطق جنوب شرقی ایران و جنوب غربی کشور پاکستان گرادیان فشار بین مناطق با دمای کمتر و مناطقی با دمای بیشتر، شرایط را برای صعود هوا در سطح زمین فراهم می‌کند که شرایط را برای ترابرد ذرات گردوخاک فراهم می‌کند.

بارش در منطقه غرب آسیا دارای وردایی بسیار زیادی در طول جغرافیایی است. بطوری‌که بیشینه هسته‌های بارشی بر فراز کشور ترکیه، کشورهای حوضه قفقاز، سواحل جنوبی دریای خزر و رشته‌کوه زاگرس با مقادیر ماهانه بیش از ۳۵۰ میلی‌متر بر اساس برونداد مجموعه داده AgERA5 دیده می‌شود (شکل ۲-ج). بیشینه بارش مطابق با انتظار در ماه‌های سرد سال و در غرب و شمال غرب منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است و مقادیر بالای بارش‌های ثبت شده در ماه‌های ژوئیه و اوت در مناطق شرقی پاکستان مربوط به بارش‌های موسمی تابستانه است. سواحل جنوبی دریای خزر نیز در ماه‌های مختلف سال مقادیر بالایی از بارش را نشان می‌دهند که این مقدار در فصل پاییز بیش از سایر فصول است. از ماه دسامبر تا مارس غرب و شمال غرب ایران به دلیل توپوگرافی و وجود رشته‌کوه‌های زاگرس مقادیر بالای بارش را نشان می‌دهند. مقایسه پهنه‌های بارشی با غلظت گردوخاک به روشنی نشان‌دهنده رابطه معکوس بین این دو متغیر در منطقه مورد مطالعه است که نتایج آن در نقشه همبستگی ارائه شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

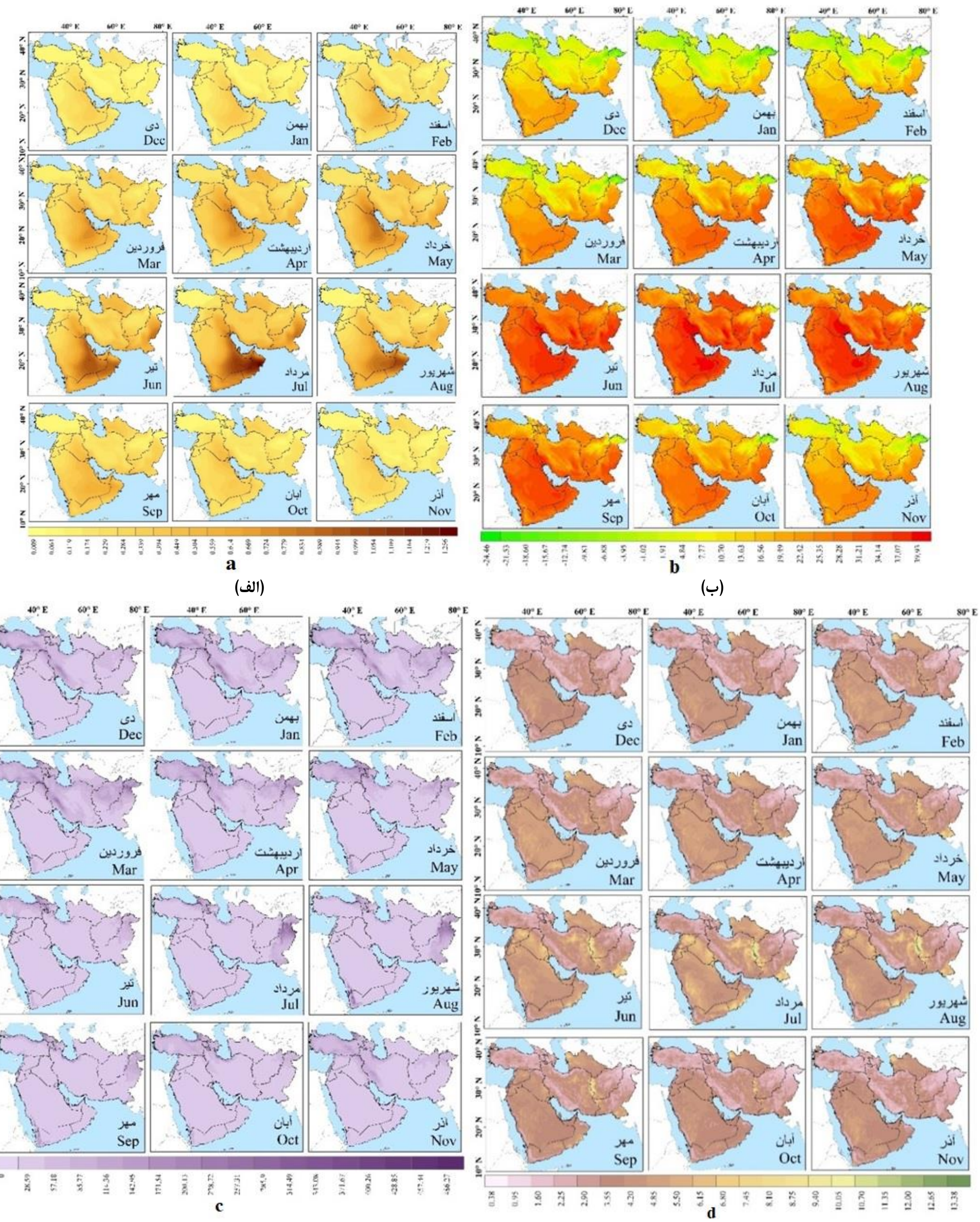
مناطق وسیعی در غرب و جنوب غرب و جنوب منطقه مورد مطالعه در کشورهای عربستان، عراق، یمن و عمان مقادیر پایینی از بارش را در طول سال دارند به‌طوری‌که مقدار متوسط سالانه بارش در عربستان (۸۴/۰۱ میلی‌متر)، عراق (۲۲۴/۸۹ میلی‌متر)، یمن (۱۷۱/۴۶ میلی‌متر) و عمان (۵۰/۰۱ میلی‌متر) می‌باشد که یکی از دلایل اصلی افزایش غلظت گردوخاک در این مناطق می‌باشد چرا که کاهش بارش باعث کاهش رطوبت خاک و آسیب‌پذیری آن در مقابل فرسایش بادی می شود و ذرات بیشتری را جهت ترابرد در دسترس باد قرار می‌دهد.

بررسی تغییرات ماهانه تندی باد نشان داد که این متغیر تابع فصل بوده و در ماه‌های ژوئن تا اوت در فصل بهار مقادیر بیشینه میانگین بلند مدت را با مقادیر ۱۱/۳ متر بر ثانیه و ۱۳/۳ متر بر ثانیه نشان می‌دهند. به‌دلیل تفکیک افقی بالای داده‌های AgERA5 دو باد منطقه‌ای بسیار مهم در غرب آسیا توسط این داده‌ها آشکار شده است. همانطور که در شکل (۲-د) دیده می‌شود هسته‌های بیشینه تندی باد در ماه‌های می تا نوامبر در شرق ایران در مرز کشور افغانستان دیده می‌شود. این مقادیر از تندی باد در منطقه به‌دلیل باد ۱۲۰ روزه سیستان است که باعث افزایش غلظت گردوخاک در دشت سیستان و بخصوص منطقه زابل می‌شود.

منطقه بیشینه بعدی با تندی باد در فصل تابستان بر فراز منطقه بین‌النهرین تا کشور کویت و بخش‌های شمال‌شرقی کشور عربستان دیده می‌شود، به‌طوری‌که میانگین تندی باد برای این منطقه در فصل تابستان ۵/۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد این کانون بیشینه از تندی باد به دلیل باد شمال تابستانه است که غلظت گردوخاک را در طول فصل تابستان بر فراز بین‌النهرین، کشور کویت و بخش‌هایی از جنوب غرب به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. بطور کلی تندی باد با افزایش عرض جغرافیایی کاهش می‌یابد. در بخش‌های شمالی کشور ترکیه و ایران و بخش‌های بزرگی از شمال شرق کشورهای افغانستان و پاکستان که تندی باد کمینه دارند مقدار غلظت گردوخاک نیز به شکل قابل توجهی کاهش یافته است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم این دو متغیر است (شکل ۳).

بررسی محرک‌های احتمالی اقلیمی در تغییرات غلظت گردوخاک برای مناطق مختلف با محاسبه همبستگی بین سری‌های زمانی غلظت گردوخاک و متغیرهای دما، بارش و تندی باد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد بین غلظت گردوخاک و بارش همبستگی معکوس و بین غلظت گردوخاک با دما و تندی باد رابطه مستقیم وجود دارد. بالاترین همبستگی‌ها بین غلظت گردوخاک و دما محاسبه شده است که این مقدار در ماه‌های گرم سال به ۰/۸ نیز رسیده است. در مقابل بالاترین همبستگی‌های منفی نیز در دوره سرد سال (فصول زمستان و پاییز) بین غلظت گردوخاک و بارش با مقدار ۰/۷- محاسبه شده است. ضریب همبستگی بین غلظت گردوخاک و تندی باد در ماه‌های ژانویه تا می و نوامبر تا دسامبر عمدتاً بالای ۰/۶ است این مقدار در فصل تابستان همبستگی کمتری را نشان می‌دهد (شکل ۳).

روند غلظت گرد و خاک در چهار دهه گذشته (۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰) برای مقادیر ماهانه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴). در بیش‌تر ماه‌های سال غلظت گردوخاک روند افزایشی را در غالب مناطق نشان می‌دهد، از ماه‌های مارس تا ژوئیه روند افزایشی در چشمه‌های فعال گردوخاک در بین‌النهرین، بیابان‌های عراق و سوریه، بیابان ربع‌الخالی، الدهنا و النفود در عربستان و بیابان تار در پاکستان مشاهده می‌شود. این روند افزایشی به‌صورت چرخه‌ای از اوایل بهار شروع می‌شود و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه به اوج می‌رسد و از ماه سپتامبر شدت روند کاهش می‌یابد و در ماه دسامبر به حداقل مقدار خود می‌رسد.



شکل ۲- پراکنش فضایی ماهانه؛ الف) غلظت گردوخاک (واحد: گرم بر متر مربع)، ب) دما (واحد: درجه سلسیوس)، ج) بارش (واحد: میلی‌متر)، د) تندی باد (واحد: متر بر ثانیه)، طی دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۱

Figure 2- Monthly spatial distribution; a) Dust column mass density (unit: g/m^2), b) temperature (unit: ^oc), c) precipitation (unit: mm), d) wind speed (unit: m/s), during the 1981-2020

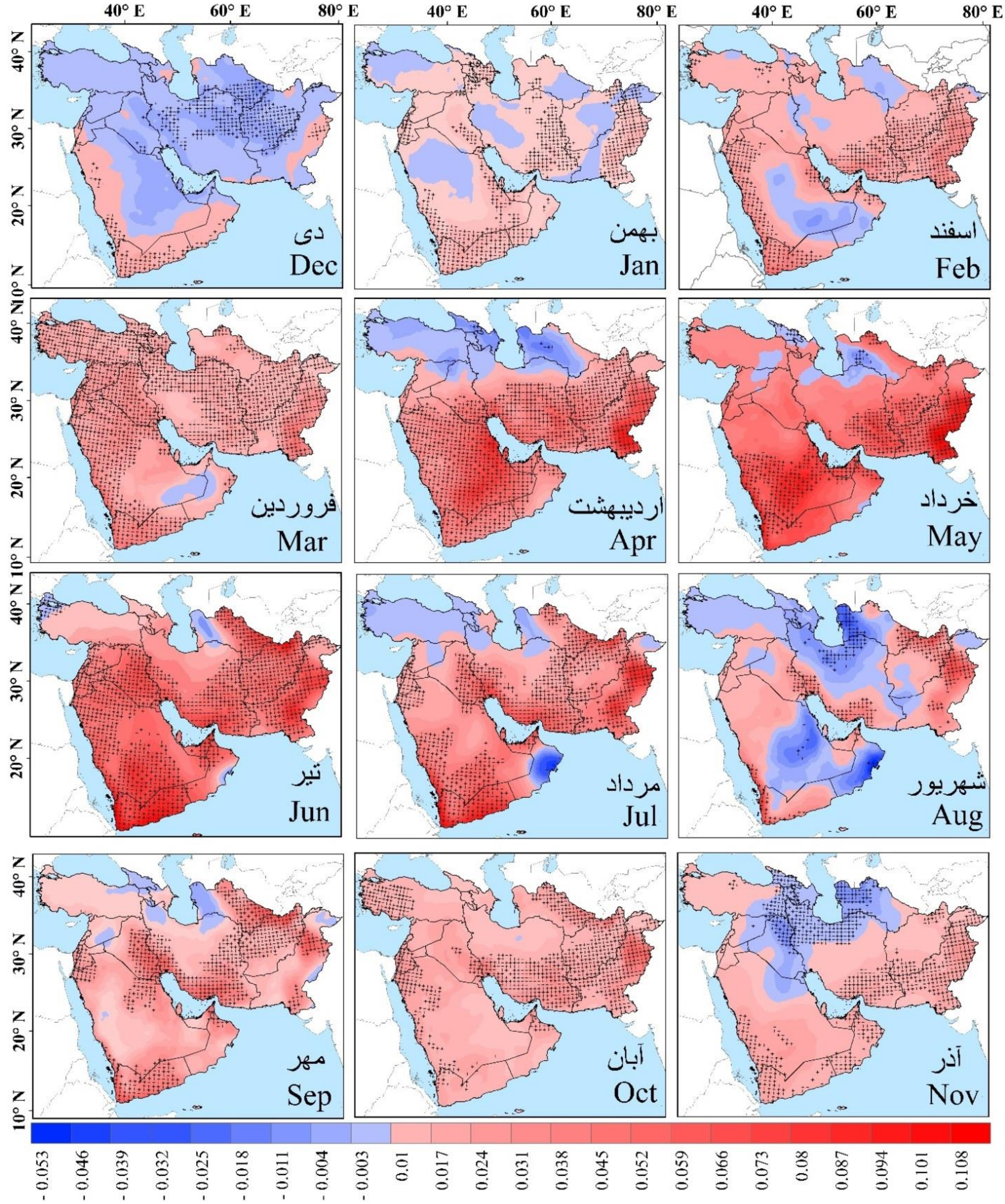
	Dust.jan	Dust.feb	Dust.mar	Dust.apr	Dust.may	Dust.jun	Dust.jul	Dust.aug	Dust.sep	Dust.oct	Dust.nov	Dust.dec
pr-jan	-0.50	-0.50	-0.49	-0.47	-0.55	-0.60	-0.56	-0.59	-0.62	-0.51	-0.47	-0.49
pr-feb	-0.55	-0.54	-0.53	-0.53	-0.60	-0.60	-0.55	-0.59	-0.65	-0.57	-0.53	-0.55
pr-mar	-0.56	-0.55	-0.54	-0.54	-0.60	-0.59	-0.54	-0.58	-0.64	-0.58	-0.53	-0.55
pr-apr	-0.56	-0.57	-0.57	-0.59	-0.63	-0.59	-0.56	-0.58	-0.64	-0.60	-0.54	-0.55
pr-may	-0.53	-0.54	-0.55	-0.58	-0.61	-0.54	-0.50	-0.53	-0.60	-0.60	-0.53	-0.52
pr-jun	-0.44	-0.44	-0.44	-0.47	-0.48	-0.38	-0.34	-0.38	-0.46	-0.50	-0.45	-0.44
pr-jul	-0.30	-0.28	-0.27	-0.27	-0.23	-0.11	-0.09	-0.14	-0.22	-0.29	-0.32	-0.32
pr-aug	-0.28	-0.26	-0.26	-0.26	-0.21	-0.08	-0.05	-0.11	-0.18	-0.27	-0.30	-0.30
pr-sep	-0.34	-0.33	-0.34	-0.35	-0.33	-0.23	-0.20	-0.24	-0.30	-0.35	-0.34	-0.34
pr-oct	-0.45	-0.47	-0.48	-0.49	-0.53	-0.49	-0.45	-0.48	-0.52	-0.49	-0.43	-0.44
pr-nov	-0.44	-0.45	-0.45	-0.43	-0.51	-0.56	-0.53	-0.55	-0.57	-0.44	-0.38	-0.41
pr-dec	-0.46	-0.47	-0.46	-0.45	-0.53	-0.58	-0.54	-0.57	-0.60	-0.48	-0.43	-0.45
Wind-jan	0.56	0.54	0.53	0.53	0.54	0.46	0.37	0.44	0.55	0.58	0.60	0.59
Wind-feb	0.58	0.56	0.55	0.56	0.56	0.48	0.41	0.46	0.57	0.60	0.61	0.60
Wind-mar	0.58	0.57	0.55	0.56	0.57	0.50	0.42	0.48	0.58	0.60	0.61	0.60
Wind-apr	0.56	0.54	0.54	0.57	0.58	0.49	0.41	0.47	0.57	0.61	0.60	0.58
Wind-may	0.48	0.48	0.48	0.53	0.54	0.45	0.39	0.43	0.51	0.55	0.52	0.50
Wind-jun	0.44	0.43	0.44	0.51	0.51	0.39	0.33	0.35	0.44	0.53	0.50	0.46
Wind-jul	0.38	0.37	0.36	0.41	0.43	0.35	0.29	0.31	0.39	0.45	0.42	0.40
Wind-aug	0.36	0.35	0.35	0.39	0.41	0.33	0.28	0.30	0.37	0.43	0.41	0.38
Wind-sep	0.39	0.38	0.38	0.43	0.43	0.35	0.30	0.33	0.41	0.47	0.44	0.42
Wind-oct	0.45	0.44	0.43	0.46	0.46	0.38	0.31	0.36	0.48	0.52	0.52	0.49
Wind-nov	0.55	0.53	0.51	0.52	0.53	0.44	0.35	0.42	0.55	0.58	0.61	0.59
Wind-dec	0.56	0.54	0.52	0.52	0.53	0.45	0.37	0.43	0.55	0.58	0.60	0.60
Tas-jan	0.65	0.65	0.63	0.59	0.69	0.77	0.75	0.78	0.79	0.64	0.55	0.61
Tas-feb	0.66	0.66	0.65	0.61	0.71	0.78	0.76	0.79	0.80	0.65	0.57	0.62
Tas-mar	0.68	0.69	0.68	0.65	0.75	0.80	0.78	0.80	0.81	0.68	0.60	0.65
Tas-apr	0.70	0.71	0.72	0.70	0.78	0.80	0.78	0.80	0.82	0.72	0.63	0.67
Tas-may	0.73	0.74	0.75	0.75	0.81	0.79	0.76	0.78	0.82	0.76	0.68	0.70
Tas-jun	0.71	0.73	0.74	0.76	0.80	0.74	0.70	0.73	0.79	0.78	0.70	0.70
Tas-jul	0.73	0.74	0.75	0.77	0.79	0.69	0.65	0.68	0.76	0.80	0.74	0.73
Tas-aug	0.75	0.75	0.76	0.78	0.79	0.69	0.64	0.68	0.77	0.81	0.75	0.75
Tas-sep	0.73	0.73	0.74	0.75	0.79	0.72	0.68	0.71	0.79	0.78	0.71	0.72
Tas-oct	0.70	0.70	0.70	0.71	0.77	0.74	0.72	0.74	0.79	0.73	0.65	0.68
Tas-nov	0.67	0.67	0.67	0.64	0.73	0.77	0.76	0.78	0.79	0.67	0.58	0.64
Tas-dec	0.65	0.64	0.63	0.59	0.69	0.76	0.75	0.78	0.78	0.63	0.55	0.61

شکل ۳- ضریب همبستگی بدون تاخیر و تاخیرهای ۱ ماهه تا ۱۲ ماهه بین غلظت گردوخاک (DUCMASS) ماهانه با متغیرهای اقلیمی بارش (Pr)، تندی باد (Wind) و دما (Tas)

Figure 3- Correlation coefficient between monthly dust mass density with climate variables of precipitation (Pr), wind speed (Wind) and temperature (Tas).

نکته حائز اهمیت این است که چرخه تغییرات روند ماهانه غلظت گردوخاک با چرخه تغییرات غلظت گردوخاک منطبق می‌باشد. بخش های شمالی ایران و کشور ترکیه بالاترین فراوانی را در بین ماه‌های مختلف سال با روند کاهشی غلظت گردوخاک دارند. روند افزایشی غلظت گردوخاک در فصول بهار و تابستان در مناطق بین‌النهرین، بیابان‌های عراق، سوریه و یمن، دشت سیستان و بیابان تار در پاکستان و جنوب شرق ایران در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است (شکل ۴).

بررسی روند غلظت گردوخاک نشان داده است که روند افزایشی در هشت ماه از سال در منطقه بین‌النهرین داری روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است. این روند افزایشی در منطقه یاد شده برای غرب و جنوب غرب ایران یک تهدید جدی است. در نقطه مقابل غلظت گردوخاک در شمال شرقی ایران بر فراز ترکمنستان دارای روند کاهشی در هشت ماه از سال است. با این حال روند این متغیر در ماه‌های سرد سال همانند اکتبر، ژانویه و فوریه دارای روند افزایشی است. این روند در ماه ژانویه در منطقه شمال شرقی ایران دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است. این روند افزایشی می‌تواند در تغییرات مقدار بار ورودی ذرات گردوخاک به شهرهای شمال شرقی ایران از جمله کلانشهر مشهد نقش داشته باشد. یکی از کانون‌های با روند افزایشی بیشینه معنی‌دار در منطقه غرب آسیا، در جنوب شرقی ایران و بخش های غربی کشورهای افغانستان و پاکستان است، بطوری‌که دما در این منطقه روند افزایشی معنی‌دار را در سطح ۰/۰۵ برای غلظت گردوخاک نشان داده است (شکل ۴). پس از این منطقه سواحل خلیج فارس و بخصوص جنوب غربی ایران با هفت ماه از سال با روند افزایشی معنی-دار در غلظت گردوخاک بیشینه روند افزایشی این متغیر را نشان داده‌اند.



شکل ٤- روند غلظت گردوخاک ماهانه در بازه زمانی ۲۰۲۰-۱۹۸۱ بر اساس برونداد مجموعه داده MERRA-2

مناطق همراه با هاشور در نقشه معنی‌داری روند را در سطح ۰/۰۵ بر اساس روش من-کندال تصحیح شده نشان می‌دهند (واحد: گرم/متر مربع/دهه).

Figure 4- Monthly dust mass density trends in the 1981-2020 based on the MERRA-2 dataset

Areas with hatches in the map show significant trends at the 0.05 level based on the modified Mann-Kendall test (unit: g/m^2/decade).

بیشینه روند افزایشی غلظت گردوخاک ۰/۱ گرم/متر مربع/دهه در ماه‌های آوریل تا اوت به‌دست آمده است و کمینه شدت روند نیز با مقدار ۰/۰۵ گرم/متر مربع/دهه عمدتاً در ماه‌های سرد سال دیده می‌شود. روند کاهشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ همچنین در دوره گرم سال نیز در ماه‌های آوریل، ژوئیه و اوت نیز قابل مشاهده است. بیشینه گستره روند کاهشی در منطقه غرب آسیا در ماه دسامبر و بیشینه گستره روند افزایشی در ماه اکتبر دیده می‌شود. به رغم اینکه این دو به‌ترتیب بیشینه گستره روند کاهشی و افزایشی را نشان داده‌اند اما بیشینه شدت روند را در اختیار ندارند. بطوری‌که بیشینه شدت روند افزایشی هم از نظر گستره جغرافیایی و هم شدت در ماه می دیده می‌شود. برای روند کاهشی نیز بیشینه گستره و شدت روند کاهشی در ماه اوت به‌دست آمده است (شکل ۴).

نتیجه‌گیری

انتشار گردوخاک به‌عنوان یکی از مخاطرات محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود. درک عوامل مؤثر در افزایش غلظت گردوخاک برای هشدار اولیه و کاهش آسیب‌های ناشی از آن بسیار مهم است. عوامل زیادی بر الگوهای فضایی و زمانی غلظت گردوخاک تأثیر می‌گذارند این تحقیق به بررسی نقش متغیرهای اصلی اقلیمی همانند دما، بارش و تندی باد در تغییرات غلظت گردوخاک در منطقه غرب آسیا پرداخته است. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به شرح زیر است:

نتایج نشان داد در ماه‌های سرد سال و بخصوص فصل زمستان، غلظت گردوخاک به‌دلیل اینکه خاک هنوز مرطوب است و به‌عنوان عامل بازدارنده مانع از ترابرد گردوخاک می‌شود تغییرات چندانی ندارد. این در حالی است که در تابستان غلظت گردوخاک به‌دلیل افزایش دما، افزایش تندی باد، کاهش بارش و به تبع آن کاهش رطوبت خاک افزایش می‌یابد.

تغییرات ماهانه غلظت گردوخاک بر اساس برونداد MERRA-2 نشان داد در ماه ژوئیه مساحت زیادی از منطقه مورد مطالعه در پهنه اقلیمی بیابانی گرم و خشک (BWh) مقادیر بالای گردوخاک را در منطقه مورد مطالعه دارند.

بیشینه غلظت گردوخاک در فصول بهار و تابستان به‌دلیل کاهش بارش، افزایش دما و تندی باد و کمبود پوشش گیاهی و اقلیم بیابانی خشک آن شرایط را برای افزایش غلظت گردوخاک مهیا نموده است.

تغییرات ماهانه متغییر بارش نشان داد غلظت گردوخاک با بارش رابطه معکوس دارد. البته این رابطه معکوس برای چشمه‌های گردوخاک صادق است و در مناطقی مانند غرب و جنوب غرب ایران با وجود بارش‌های مناسب شاهد افزایش غلظت گردوخاک می‌باشیم که این نکته تأثیر چشمه‌های برون مرزی را در ترابرد گردوخاک به این مناطق نشان می‌دهد همین نکته در شرق پاکستان هم مشاهده می‌شود که با وجود مقادیر بالای بارش شاهد مقادیر بالایی از غلظت گردوخاک نیز هستیم که علت آن وجود چشمه فعال گردوخاک مربوط به بیابان تار و وجود شهرهای پرجمعیت پیشاور، راولپندی، ژوب، لاهور، مولتان، خان، روهری و کراچی می‌باشد (Alam *et al*., 2010).

تغییرات میانگین بلندمدت متغییر دما نشان می‌دهد غلظت گردوخاک با دما رابطه مستقیم دارد و چشمه‌های فعال گردوخاک در عراق (منطقه میانرود یا بین‌النهرین)، مناطق بیابانی کشور عربستان (بیابان ربع‌الخالی، الدهنا، النفود)، پاکستان (بیابان تار)، ترکمنستان (بیابان قزل قوم، قره قوم، بستر خشکیده آرال قوم و قره بغاز) دارای بیشینه دما می‌باشند. البته موارد استثنا همچون دشت لوت در ایران با وجود دمای بالا، گردوخاک پایینی دارد. چرا که رشته کوه‌های زاگرس همانند سدی مانع از ترابرد گردوخاک به این منطقه شده است.

در فصل تابستان تندی باد در منطقه مورد مطالعه افزایش چشمگیری دارد که باعث افزایش غلظت گردوخاک از چشمه‌های بین النهرین، بیابان‌های عراق و سوریه به سمت استان‌های غربی ایران می‌باشد. از سوی دیگر در ارتفاعات و عرض های جغرافیایی بالا تندی باد به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که این امر به همراه مقدار پوشش گیاهی بالای این مناطق و دوری از چشمه‌های گردوخاک فعال در غرب آسیا باعث شده است تا این مناطق مقدار غلظت گردوخاک پایینی را داشته باشند.

بررسی ضرایب همبستگی بدون تأخیر و با تأخیر نشان داده است که بین متغیرهای اقلیمی تندی باد و دما با غلظت گردوخاک در غرب آسیا رابطه مستقیم وجود دارد در مقابل بین غلظت گردوخاک و بارش همبستگی منفی دیده می‌شود. بالاترین ضرایب همبستگی مستقیم بین غلظت گردوخاک و دما به‌دست آمده است و بالاترین ضریب همبستگی معکوس نیز بین غلظت گردوخاک و بارش بخصوص در ماه‌های سرد سال محاسبه شده است.

بررسی روند غلظت گردوخاک ماهانه نشان داده است که مقدار این متغیر در اکثر ماه‌های سال در مناطقی با گردوخاک بالا همانند بین النهرین، جنوب‌غربی ایران، جنوب و جنوب شرقی ایران دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است.

References

1. Alam, K., Iqbal, M.J., Blaschke, T., Qureshi, S., & Khan, G. (2010). Monitoring spatio-temporal variations in aerosols and aerosol–cloud interactions over Pakistan using MODIS data. *Advances in Space Research*, *46*(9), 1162-1176. https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.025
2. Alonso-Montesinos, J., Martínez, F.R., Polo, J., Martín-Chivelet, N., & Batlles, F.J. (2020). Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production. *Energies*, *13*(23), 6376. https://doi.org/10.3390/en13236376
3. Asadi Rahim-Begi, N., Zarrin, A., Modfidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Seasonal distribution analysis of extreme precipitation in Iran using AgERA5 dataset. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(11), 2723-2737. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.333263.669118
4. Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., & Thépaut, J.N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *147*(741), 4186-4227. https://doi.org/10.1002/qj.4174
5. Moradi, H., Zangane, A.M., & Pourhashemi, S. (2019). Evaluation of the role of drought in frequency of dust in Khorasan Razavi province. (In Persian). https://doi.org/10.22034/jest.2019.10464
6. Brown, D., de Sousa, K., & van Etten, J. (2023). ag5Tools: An R package for downloading and extracting agrometeorological data from the AgERA5 database. *SoftwareX*, *21*, 101267. https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101267
7. Caido, N.G., Ong, P.M., Rempillo, O., Galvez, M.C., & Vallar, E. (2022). Spatiotemporal analysis of MODIS aerosol optical depth data in the Philippines from 2010 to 2020. *Atmosphere*, *13*(6), 939. https://doi.org/10.3390/atmos13060939
8. Chen, S., Liu, J., Wang, X., Zhao, S., Chen, J., Qiang, M., & Chen, F. (2021). Holocene dust storm variations over northern China: transition from a natural forcing to an anthropogenic forcing. *Science Bulletin*, *66*(24), 2516-2527. https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.08.008
9. Dadashi-Roudbari, A. (2020). Analysis of spatiotemporal variations of vertical and horizontal patterns of aerosols and evaluation of its Climate feedback in Iran, Ph.D. Thesis Urban Climatology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian)
10. Dadashi-Roudbari, A., Ahmadi, M., & Shakiba, A. (2020). Seasonal Study of dust deposition and fine particles (PM 2.5) in Iran Using MERRA-2 data. *Iranian Journal of Geophysics (IJG)*, *13*(4), 43-59.
11. Dadashi-Roudbari, A., & Ahmadi, M. (2021). An assessment of change point and trend of diurnal variation of dust storms in Iran: a multi-instrumental approach from in situ, multi-satellite, and reanalysis dust product. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *133*, 1523-1544. https://doi.org/10.1007/s00703-021-00825-x
12. Dar, M.A., Ahmed, R., Latif, M., & Azam, M. (2022). Climatology of dust storm frequency and its association with temperature and precipitation patterns over Pakistan. *Natural Hazards*, *110*(1), 655-677. https://doi.org/10.1002/joc.5019
13. Daufresne, M., Lengfellner, K., & Sommer, U. (2009). Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(31), 12788-12793. https://doi.org/10.1073/pnas.0902080106
14. Fallah Zazuli, M., Vafaeinezhad, A., Kheirkhah Zarkesh, M.M., & Ahmadi Dehka, F. (2014). Source routing of dust haze phenomenon in the west and southwest of Iran and its synoptic analysis by using remote sensing and GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, *5*(4), 61-78. (In Persian)
15. Goudie, A.S., & Middleton, N.J. (2006). Desert dust in the global system. *Springer Science & Business Media*.
16. Hamed, K.H., & Rao, A.R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, *204*(1-4), 182-196. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X
17. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz- Sabater, J., & Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999-2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803
18. Heydari, A., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Investigating the performance of the deterministic and probabilistic versions (multi-member ensemble) of the ERA5 dataset in estimating Iran's temperature. *Researches in Earth Sciences*, *14*(4), 1-20. (In Persian)
19. Jafari, M., Mesbahzadeh, T., Masoudi, R., Zehtabian, G., & Amouei Torkmahalleh, M. (2021). Dust storm surveying and detection using remote sensing data, wind tracing, and atmospheric thermodynamic conditions (case study: Isfahan Province, Iran). *Air Quality, Atmosphere & Health*, *14*, 1301-1311. https://doi.org/10.1007/s11869-021-01021-x
20. Jiao, D., Xu, N., Yang, F., & Xu, K. (2021). Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. *Scientific Reports*, *11*(1), 17956. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97432-y
21. Jin, Q., Wei, J., Lau, W.K., Pu, B., & Wang, C. (2021). Interactions of Asian mineral dust with Indian summer monsoon: Recent advances and challenges. *Earth-Science Reviews*, *215*, 103562. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103562
22. Knoben, W.J., Freer, J.E., & Woods, R.A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(10), 4323-4331. https://doi.org/10.5194/

hess-23-4323-2019

23. Koster, R.D., McCarty, W., Coy, L., Gelaro, R., Huang, A., Merkova, D., & Wargan, K. (2016).MERRA-2 input observations: Summary and assessment.
24. Li, Z., Lau, W.M., Ramanathan, V., Wu, G., Ding, Y., Manoj, M.G., & Brasseur, G.P. (2016). Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Reviews of Geophysics, 54*(4), 866-929. https://doi.org/10.1002/2015RG000500
25. Liu, C., Yin, Z., He, Y., & Wang, L. (2022). Climatology of dust aerosols over the Jianghan Plain revealed with space-borne instruments and MERRA-2 reanalysis data during2006–2021. *Remote Sensing*, *14*(17), 4414. https://doi.org/10.3390/rs14174414
26. Middleton, N. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*, *9*(6), 261. https://doi.org/10.3390/geosciences9060261
27. Middleton, N., Kashani, S.S., Attarchi, S., Rahnama, M., & Mosalman, S.T. (2021). Synoptic causes and socio-economic consequences of a severe dust storm in the Middle East. *Atmosphere*, *12*(11), 1435. https://doi.org/10.3390/atmos12111435
28. Mukherjee, T., Vinoj, V., Midya, S.K., & Adhikary, B. (2020). Aerosol radiative impact on surface ozone during a heavy dust and biomass burning event over South Asia. *Atmospheric Environment*, *223*, 117201. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117201
29. Rushingabigwi, G., Nsengiyumva, P., Sibomana, L., Twizere, C., & Kalisa, W. (2020). Analysis of the atmospheric dust in Africa: The breathable dust's fine particulate matter PM2.5 in correlation with carbon monoxide. *Atmospheric Environment*, *224*, 117319. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117319
30. Sarkar, S., Chauhan, A., Kumar, R., & Singh, R.P. (2019). Impact of deadly dust storms (May 2018) on air quality, meteorological, and atmospheric parameters over the northern parts of India. *GeoHealth*, *3*(3), 67-80. https://doi.org/10.1029/2018GH000170
31. Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G.H., & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, *2*(4), 181-204. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001
32. Shi, L., Zhang, J., Yao, F., Zhang, D., & Guo, H. (2021). Drivers to dust emissions over dust belt from 1980 to 2018 and their variation in two global warming phases. *Science of The Total Environment*, *767*, 144860. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144860
33. Soltani, M.J., Motamedvaziri, B., Noroozi, A.A., Ahmadi, H., & Mosaffaei, J. (2021). Identifying and prioritizing the factors affecting the creation of dust in Hendijan City and providing management solutions by DPSIR framework. *Watershed Engineering and Management*, *13*(2), 269-282. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.352406.1848
34. Sujitha, P.R., Santra, P., Bera, A.K., Verma, M.K., & Rao, S.S. (2022). Detecting dust loads in the atmosphere over Thar desert by using MODIS and INSAT-3D data. *Aeolian Research*, *57*, 100814. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2022.100814
35. Sun, J., Ding, K., Lai, Z., & Huang, H. (2022). Global and regional variations and main drivers of aerosol loadings over land during 1980–2018. *Remote Sensing*, *14*(4), 859. https://doi.org/10.3390/rs14040859
36. Tariq, S., Nawaz, H., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2021). Investigating the relationship of aerosols with enhanced vegetation index and meteorological parameters over Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, *12*(6), 101080. https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101080
37. Willmott, C.J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. *Spatial Statistics and Models*, 443-460. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23
38. Wu, J., Kurosaki, Y., & Du, C. (2020). Evaluation of climatic and anthropogenic impacts on dust erodibility: A case study in Xilingol Grassland, China. *Sustainability*, *12*(2), 629. https://doi.org/10.3390/su12020629
39. Yu, C., Li, Z., & Blewitt, G. (2021). Global comparisons of ERA5 and the operational HRES tropospheric delay and water vapor products with GPS and MODIS. *Earth and Space Science*, *8*(5), e2020EA001417. https://doi.org/10.1029/2020EA001417
40. Zarrin, A., Salehabadi, N., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A.A. (2022). Investigation of Seasonal dust in northeastern Iran and numerical simulation of extreme dust events using WRF-CHEM model. *Journal of the Earth and Space Physics*, *48*(2), 421-440. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jesphys.2022.330319.1007361